

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



بررسی تأثیر جرم و موقعیت ارتفاعی میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات ناشی از باد ساختمان‌های بلند*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.70265.1039

نهمت خدایی[۱]　　حامد تیموری[۲]

چکیده *میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD از تجهیزات مهم برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها می‌باشد. مطالعات پیشین در زمینه تأثیر TMD برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها در مقابل باد، عمدتاً برای ویژگی‌های ثابتی از میراگر انجام شده است. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای جرم و ارتفاع محل نصب TMD در کنترل ارتعاشات طولی و عرضی ناشی از باد ساختمان‌های بلند مطالعه شد. برای این منظور، ساختمان بلندی با پلان مربع و ارتفاع ٤۰۰ متر به صورت تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها مدل‌سازی شد. ارتعاشات سازه در برابر باد به ازای محدوده وسیعی از پارامترهای مورد مطالعه، با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس و تئوری ارتعاشات تصادفی محاسبه شد. مطابق نتایج، با افزایش جرم میراگر، ارتعاشات سازه و TMD کاهش می‌یابد. برای مثال، کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی سازه برای میراگر جرمی ۱۰۰ و ٦۰۰ تنی واقع در تراز فوقانی، به ترتیب ۳۱ و ٤۸ درصد به دست آمد. با افزایش ارتفاع محل نصب TMD، تأثیر کنترلی آن افزایش و جابه‌جایی TMD تا حد کمی کاهش می‌یابد. به‌طور نمونه، برای میراگر جرمی ۳۰۰ تنی نصب شده در ارتفاع‌های ۳۲۰ و ٤۰۰ متری، کاهش شتاب عرضی سازه به ترتیب ۳۳/۷۲ و ٤۱/۲۸ درصد و انحراف معیار جابه‌جایی TMD به‌ترتیب ۵۸/٦۸ و ۵٤/۹۲ سانتی‌متر تعیین شد.*

واژه‌های کلیدی میراگر جرمی تنظیم شونده، ساختمان بلند، ارتعاشات ناشی از باد، پاسخ طولی باد، پاسخ عرضی باد.

Investigation of the Effect of the Mass and Installation Height of TMD System on the Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings

Nahmat Khodaie　　Hamed Teimouri

Abstract *Tuned mass damper(TMD) is an efficient tool to control wind-induced vibrations of tall buildings. Previous studies on the effect of TMD are generally limited to specific conditions. In the present study, the effect of the mass and installation height of TMD on the wind-induced vibration control of tall buildings are investigated. An example of tall building with the height 400 m and square variable cross section is presented. The analytical model of the building is assumed as a multi-degrees-of-freedom vertical cantilever beam with the masses lumped at the nodes. The wind-induced responses of the structure are computed using the frequency domain analysis and the random vibration method for a wide range of studied parameters. The resultsindicated that the vibrations of the structure and TMD system decreases with increasing the mass of theTMD. For instance, the 100 and 600-ton TMD installed at top-floor reduced the top-floor crosswind acceleration by 31 and 48 percent, respectively. By increasing the installation height, the control effectiveness of the system increases, while the vibration of the TMD does not change considerablyFor a 300-ton TMD installed at 320 and 400 m heights, the crosswind acceleration reduced by 33.72 and 41.28 percent and the RMS displacement of the TMD at these heights were 58.68 and 54.92 cm, respectively.*

Keywords Tuned mass damper, Tall building, Wind-induced vibrations, Cross wind, Along-wind.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۲/۱٦ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۸/۲٤ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه آموزشی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خورموج.

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آموزشی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خورموج.

Email: Nahmat.khodaie@iau.ac.ir

مقدمه و تاریخچه تحقیقات

کمبود زمین و ارزش بالای آن در شهرهای بزرگ، موجب افزایش تقاضا برای احداث ساختمان‌های مرتفع شده است. افزایش ارتفاع سازه‌ها، موجب لاغرتر شدن و افزایش دوره تناوب آنها و در نتیجه حساستر شدن ساختمان‌های مذکور نسبت به نیروی باد شده است. تأمین معیارهای جابه‌جایی و شتاب مجاز از معیارهای مهم در طراحی ساختمان‌های بلند محسوب می‌شود. حرکات ناشی از باد می‌تواند موجب ناآرامی و عصبی شدن ساکنان آن ساختمان‌ها شود که از علائم آن نگرانی، خشم، ترس یا سردرد می‌باشد. از اهداف مهم در کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند، به کاهش نیروهای داخلی ناشی از بارهای جانبی و اقتصادیتر شدن طرح، تأمین معیارهای بهره‌برداری، ارتقای ایمنی سازه، افزایش میرایی ساختمان و امکان احداث ساختمان‌های فوق بلند می‌توان اشاره نمود. شاخص دریفت به صورت نسبت برایند جابه‌جایی ماکزیمم در تراز فوقانی سازه به ارتفاع آن تعریف می‌شود. برای حفظ عملکرد پوشش و نمای ساختمان، این شاخص تحت نیروهای جانبی بدون ضریب به 1/400 تا 1/600 محدود می‌شود. شتاب ماکزیمم مجاز برای تأمین شرایط ایمنی معمولاً کمتر از ۲۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته می‌شود [1].

با توجه به اهمیت کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند در برابر نیروی جانبی باد، زمینه‌های متعددی برای کنترل ارتعاشات پیشنهاد شده است. در این بخش، برخی از مطالعات پیشین با محوریت استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده ارائه می‌شود. کریم و همکاران (۱۹۹۹) طی یک مطالعه مروری، تقسیم‌بندی جامعی برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها ارائه نمودند که از آن جمله می‌توان به بهبود خواص آیرودینامیکی، کاهش نسبت جرمی هوا به سازه، افزودن تجهیزات میراگر غیرفعال مانند میراگرهای ویسکوالاستیکی، اصطکاکی، میراگر جرمی یا ستون مایع تنظیم شونده و روش‌های کنترل فعال اشاره نمود [2]. امین و آهوجا (۲۰۱۰) مطالعه مروری در زمینه اصلاحات آیرودینامیکی ساختمان انجام دادند و اصلاحات آیرودینامیکی ساختمان را به دو گروه اصلاحات جزئی و اساسی تقسیم نمودند. بریدگی و انحنای گوشه‌های ساختمان، نمونه‌هایی از اصلاحات جزئی هستند و عقب‌نشینی یا تغییر مقطع ساختمان در ارتفاع و بازشدگی در بالای ساختمان از اصلاحات اساسی به شمار می‌روند [3]. شارما و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه مشابهی در زمینه اصلاحات آیرودینامیکی ساختمان‌های بلند انجام دادند. استفاده از فرم‌های پیچشی ساختمان در ارتفاع، از روش‌های توسعه یافته جدید برای کاهش نیروهای باد از موارد معرفی شده در مطالعه مذکور می‌باشد [4].

استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده از راهکارهای کاربردی و مهم برای کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند است. قربانی تنها و رحیمیان (۲۰۰۹) کنترل ارتعاشات ناشی از باد برج میلاد را با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده مطالعه کردند. طبق این مطالعه، شتاب ناشی از باد در بخش فوقانی برج سازه در حالت کنترل نشده فراتر از حد مجاز آسایش ساکنان است و استفاده از میراگر جرمی ۶۰۰ تنی در محل گنبد آسمان برج، در شرایط بهینه، مقدار جابه‌جایی و شتاب سازه را به‌ترتیب ۵۶ و ۶۰ درصد کاهش می‌دهد [5]. لو و چن (۲۰۱۱) بهینه‌سازی و طراحی میراگر جرمی برای برج مرکزی شانگهای را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، از میراگر پاندولی دوگانه با دو جرم متمرکز برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده گردید. اشغال فضای کمتر به عنوان مزیتی برای میراگر دوگانه معرفی شد [6]. لیو و همکاران (۲۰۰۸) ارتعاشات ناشی از باد ساختمان بلند مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده را با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار دادند و اعلام نمودند در خاک‌های نرم، ارتعاشات سازه در اثر بارهای دینامیکی باد کمتر از حالت خاک سفت می‌باشد و قابلیت کنترل میراگر جرمی در خاک‌های نرم بیشتر از خاک‌های سفت است [7]. لیونگ و همکاران (۲۰۰۹) پارامترهای بهینه TMD را برای یک سازه یک درجه آزادی تحت بارگذاری خارجی و ارتعاش پایه که با نویز سفید گوسی مدل شده بودند به دست آوردند و فرمول‌هایی برای این مقادیر ارائه کردند [8].

استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده برای کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله نیز به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه ادریس طاها و همکاران در خصوص ارزیابی کارایی میراگر جرمی دو جهته و پیچشی برای کنترل پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های نامنظم [9]، تحقیق کوهدرق در زمینه ارزیابی تأثیر TMD بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن آرمه جدا سازی شده [10] و مطالعه محبی و همکاران در خصوص تأثیر TMD برای کاهش پاسخ سازه‌ها با رفتار غیرخطی تحت زلزله [11] نمونه‌ای از این مطالعات می‌باشد.

در سال‌های اخیر نوع جدیدی از سیستم کنترل ارتعاشات ساختمان‌های بلند معرفی شده است که دارای قابلیت خودکنترلی است و بخشی از جرم سازه اصلی را به عنوان جاذب ارتعاش به کار می‌گیرد. وانگ و همکاران[12] سیستم‌های سازه‌ای ساختمان بلند متشکل از هسته مرکزی و بخش‌های معلق را تحت نیروی زلزله مورد بررسی قرار دادند. در این سیستم، نیاز به جرم اضافی نبوده و نسبت جرمی میراگر به سازه اصلی بیشتر از میراگرهای جرمی رایج می‌باشد. نتایج تحقیق مذکور موید قابلیت کنترل مناسب سیستم پیشنهادی در مقابل نیروی زلزله بود. خدائی و ایمانی[13] اثر روش خودکنترلی برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد برج نانجینگ در کشور چین را در مقابل نیروهای دینامیکی باد مطالعه نمودند و دریافتند این سیستم به طور مؤثری پاسخ شتاب سازه را کاهش می‌دهد و نقش مهمی در تأمین آسایش ساکنان در شرایط بحرانی نیروهای دینامیکی باد دارد.

مطالعات پیشین در زمینه اثر TMD برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها عموماً به‌ازای پارامترها و موقعیت نصب مشخصی از سیستم میراگر جرمی انجام گرفته است. در این مطالعه، تأثیر جرم و موقعیت ارتفاعی محل نصب TMD در کنترل ارتعاشات عرضی و طولی ناشی از باد ساختمان‌های بلند مورد مطالعه قرار گرفته است. سازه بلند به عنوان تیر طره‌ای قائم با جرم‌های متمرکز شده در گره‌ها مدل شده است و پاسخ سازه در حوزه فرکانس تعیین شده است. مقادیر بهینه TMD به‌ازای نسبت‌های جرمی مختلف و موقعیت ارتفاعی آن استخراج شده است. شتاب تراز فوقانی سازه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و تأثیر پارامترهای مختلف TMD شامل نسبت جرمی و موقعیت ارتفاعی آن در کارایی سیستم مورد ارزیابی و بحث و بررسی قرار گرفته است.

مدل تحلیلی و ماتریس تابع انتقال

رفتار ساختمان بلند تحت بارهای جانبی، مشابه تیر طره‌ای قائم و با مود غالب خمشی می‌باشد. این مدل رفتاری در مطالعات متعددی برای محاسبه پاسخ دینامیکی سازه‌های بلند در برابر باد به‌کار گرفته شده است [14,15]. در این مطالعه نیز ساختمان بلند، مشابه تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها مدل شده است. معادله حرکت سیستم چند درجه آزادی تحت بارهای دینامیکی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\mathbf{M\ddot{X}}+\mathbf{C\dot{X}}+\mathbf{KX}=\mathbf{F} \qquad (1)$$

که در آن $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به‌ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی کلی، $\mathbf{X}$ بردار جابه‌جایی‌های گرهی و $\mathbf{F}$ بردار نیروهای خارجی می‌باشد. ماتریس سختی سازه با تجمیع اثر سختی المان‌های تیر محاسبه می‌شود و برای کاهش حجم محاسبات، از روش تراکم درجات آزادی دورانی استفاده می‌شود. جزئیات محاسبه ماتریس سختی و تراکم درجات آزادی و محاسبه ماتریس‌های جرم و سختی در مرجع [16] ارائه شده است.

ماتریس جرم متناظر با سیستم تراکم یافته، ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن، همان جرم‌های متمرکز در گره‌ها هستند. ماتریس میرایی ذاتی سازه با استفاده از روش تناسب و پس از تحلیل مودال سازه و محاسبه اشکال، جرم‌ها و فرکانس‌های مودی از روش زیر قابل تعیین است:

$$\begin{aligned}&\mathbf{C}_s=\phi^{-\mathrm{T}}\mathrm{A}\phi^{-1}\\&\mathrm{A}=\mathrm{diag}[2\mu_1\zeta_1\omega_1 \quad \dots \quad 2\mu_j\zeta_j\omega_j \quad \dots \quad 2\mu_n\zeta_n\omega_n]\end{aligned} \qquad (2)$$

ϕماتریس اشکال مودی و μ_j ، ζ_j و ω_j به‌ترتیب جرم، میرایی و فرکانس های مودی و A ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن میرایی‌های مودی هستند.

مدل تحلیلی ساختمان بلند مجهز به میراگر جرمی، برای حالتی که میراگر جرمی در تراز فوقانی سازه نصب شده است در شکل (۱) نشان داده شده است. میراگر جرمی به صورت سیستم تک درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود که توسط مجموعه موازی جرم و فنر به سازه اصلی متصل می‌شود. پارامترهای نسبت سختی و میرایی TMD به نحوی تنظیم می‌شود که ارتعاشات سازه اصلی را به‌طور بهینه کاهش دهد. برای سازه بلند n درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده، ماتریس کلی جرم به صورت زیر قابل نوشتن می‌باشد:

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}[\mathbf{M}_{sr}]_{n\times n} & [0]_{n\times 1}\\ [0]_{1\times n} & \mathrm{m}_{\mathrm{TMD}}\end{bmatrix} \qquad (3)$$

که در آن، $\mathbf{M}_{sr}$ ماتریس جرم سازه اصلی و $\mathrm{m}_{\mathrm{TMD}}$ جرم TMD می‌باشد. ماتریس سختی کل سازه برای حالت کلی که میراگر جرمی در تراز i ام به سازه متصل شده باشد به صورت زیر قابل تعیین است:

$$\mathbf{K}=\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s(1,1) & \mathbf{K}_s(1,2) & & \mathbf{K}_s(1,i) \\ \mathbf{K}_s(1,2) & \mathbf{K}_s(2,2) & & \mathbf{K}_s(2,i) \\ M & M & & M \\ \mathbf{K}_s(i,1) & \mathbf{K}_s(i,2) & L & \mathbf{K}_s(i,i)+\mathrm{k}_{\mathrm{TMD}} \\ M & M & & M \\ \mathbf{K}_s(n,1) & \mathbf{K}_s(n,2) & & \mathbf{K}_s(n,i) \\ 0 & 0 & & -\mathrm{k}_{\mathrm{TMD}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} & \mathbf{K}_s(1,n) & 0 \\ & \mathbf{K}_s(2,n) & 0 \\ & M & M \\ \ldots & \mathbf{K}_s(i,n) & -\mathrm{k}_{\mathrm{TMD}} \\ & M & M \\ & \mathbf{K}_s(n,n) & 0 \\ & 0 & +\mathrm{k}_{\mathrm{TMD}} \end{bmatrix} \qquad (٤)$$

$\mathbf{K}_{sr}$ ماتریس سختی کاهش یافته سازه و $\mathrm{k}_{\mathrm{TMD}}$ سختی سیستم TMD هست. محاسبه ماتریس میرایی نیز مشابه ماتریس سختی انجام می‌پذیرد.

ماتریس تابع انتقال بین جابه‌جایی‌های سازه و نیروهای خارجی با تبدیل فوریه معادله (۱) به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\mathbf{H}(\omega)=(-\omega^2\mathbf{M}+\mathrm{j}\omega\mathbf{C}+\mathbf{K})^{-1} \qquad (۵)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای و j واحد موهومی می‌باشد. $\mathbf{H}(\boldsymbol{\omega})$ ماتریس انتقال و یا ماتریس تابع پاسخ فرکانسی نامیده می‌شود. ماتریس تراکم طیفی پاسخ برای سیستم چند درجه آزادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{S}_{\mathbf{x}}(\omega)=\mathbf{H}(\omega)\mathbf{S}_{\mathbf{f}}(\omega)\mathbf{H}^*(\omega) \qquad (٦)$$

که در آن $\mathbf{H}^*(\omega)$ مزدوج مختلطی ماتریس انتقال سازه و $\mathbf{S}_{\mathbf{f}}(\boldsymbol{\omega})$ ماتریس تراکم طیفی نیروی تحریک می‌باشد. درنهایت، واریانس پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه برای درجه آزادی i ام با استفاده از انتگرال عددی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

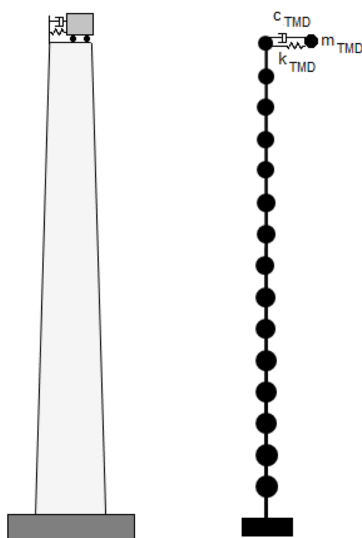
$$E[x_i^{\,2}]=\int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{ii}}(\omega)d\omega, \qquad E[\ddot{x}_i^{\,2}]=\int_{-\infty}^{+\infty} \omega^4 S_{x_{ii}}(\omega)d\omega \qquad (٧)$$

در رابطه فوق، $\mathrm{S}_{\mathrm{x}_{ii}}(\omega)$ عضو i ام روی قطر اصلی ماتریس تراکم طیفی پاسخ می‌باشد. انحراف معیار پاسخ نیز با جذرگیری از مقادیر واریانس پاسخ به دست می‌آید.

برای تعیین نسبت پاسخ ماکزیمم به انحراف معیار پاسخ، از ضریب اوج استفاده می‌شود. داونپورت عبارت زیر را برای ضریب اوج معرفی نمود [17]:

$$\mathrm{g}=\sqrt{2\ln(\nu\mathrm{T}_0)}+\frac{0.577}{\sqrt{2\ln(\nu\mathrm{T}_0)}} \qquad (۸)$$

که g ضریب اوج، ν نرخ میانگین عبور از محور افقی با شیب مثبت در واحد زمان است که عموماً برابر با فرکانس مود اول سازه در نظر گرفته می‌شود و T_0 زمان می‌باشد که مقدار آن ۳٦۰۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱ حالت کلی ساختمان بلند مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده در تراز فوقانی سازه و مدل تحلیلی آن

خصوصیات مهندسی باد و ماتریس طیف نیروهای طولی و عرضی باد

پاسخ ساختمان‌های بلند در برابر باد، شامل مؤلفه‌های طولی و عرضی باد می‌باشد. مؤلفه طولی شامل پاسخ استاتیکی و دینامیکی طولی می‌شود. سرعت باد در امتداد طولی به دو مؤلفه سرعت میانگین و نوسانی قابل تجزیه است. مؤلفه میانگین که مستقل از زمان فرض می‌شود، پاسخ استاتیکی طولی سازه را در پی دارد و مؤلفه نوسانی موجب ارتعاش سازه در امتداد طولی می‌شود. پاسخ

عرضی به ارتعاشات سازه در جهت عمود بر امتداد وزش باد گفته می‌شود. با عبور جریان از اطراف هر جسم هوابند، جریان‌های گردابی یا پیچک‌هایی در ناحیه پشت، در طرفین جسم شکل می‌گیرد. ریزش این جریان‌ها باعث تغییر الگوی فشار اطراف جسم و ایجاد نیروی عرضی می‌شود. فرکانس جریان‌های پیچشی وابسته به سرعت باد، عرض بادگیر و شکل مقطع عرضی سازه است. در این تحقیق، هر دو پاسخ طولی و عرضی سازه محاسبه می‌شود که مستلزم آن داشتن طیف نیروهای طولی و عرضی باد و پروفیل سرعت میانگین باد است که در ادامه ارائه می‌شوند.

پروفیل سرعت متوسط باد و نیروهای طولی و عرضی باد

تغییرات سرعت میانگین باد در لایه مرزی اتمسفر با قانون توانی یا لگاریتمی بیان می‌شود. حالت عمومی رابطه توانی به شکل زیر است:

$$U(z) = aU_b\left(\frac{z}{b}\right)^{\alpha} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق a، b و α پارامترهای ناحیه‌ای و U_b سرعت مبنای باد می‌باشد که در اکثر آیین‌نامه‌ها به‌عنوان مقدار سرعت میانگین باد در ارتفاع ۱۰ متر در ناحیه باز، با یک دوره بازگشت معین تعریف می‌شود. مقادیر پارامترهای رابطه (۹) برای ناحیه مراکز شهرهای بزرگ دارای ساختمان‌های بلند با تراکم بالا، مطابق آیین‌نامه کانادا به این صورت است: a=۰/٦٣٢ ، b=۳۰ متر و a=۰/٣٦ [18]. مقدار ارتفاع گرادیان، که سرعت باد در ارتفاع بالاتر از آن ثابت فرض می‌شود، در ناحیه مذکور ۳۸۷ متر است.

سرعت باد در جهت طولی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \qquad (۱۰)$$

در این رابطه $\bar{U}$ سرعت میانگین و $u(t)$ مؤلفه نوسانی در امتداد طولی باد می‌باشد. نیروی پسا به‌صورت تابعی از زمان به صورت زیر است:

$$f_D(t) = \bar{f}_D + f'_D(t) \qquad (۱۱)$$

که $\bar{f}_D$ و f'_D به‌ترتیب بخش‌های میانگین و نوسانی نیروی پسا در واحد ارتفاع می‌باشند و از روابط زیر قابل تعیین هستند:

$$\bar{f}_D = 1/2\rho_a\bar{U}^2C_DB \qquad (۱۲)$$

$$f'_D = \rho_a\bar{U}u(t)C_DB \qquad (۱۳)$$

ρ_a دانسیته هوا، U(z) سرعت میانگین باد در ارتفاع z ، C_d ضریب پسا و B عرض سازه در جهت عمود بر امتداد باد است. تابع چگالی طیفی نیروی طولی باد از رابطه زیر به دست می‌آید [1].

$$S_{f_D}(n) = \rho_a^2\bar{U}^2B^2D^2C_D^2S_u(n) \qquad (۱٤)$$

$S_u(n)$ چگالی طیفی مؤلفه نوسانی سرعت طولی باد می‌باشد.

نیروی عرضی باد در واحد ارتفاع سازه، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$F_s(z,t) = \frac{1}{2}\rho_aC_L(z,t)D(z)U^2(z) \qquad (۱۵)$$

که در آن D(z) و U(z) به‌ترتیب بعد مقابل باد و سرعت میانگین باد در ارتفاع z و $C_L(z,t)$ ضریب نیروی عرضی باد یا ضریب برا می‌باشد.

طیف نیروی طولی باد. محتوای فرکانسی نوسانات سرعت باد، با تابع تراکم طیفی نشان داده می‌شود. شکل تراکم طیفی به موقعیت و شرایط باد بستگی دارد. تابع طیف تراکم نوسانات سرعت طولی باد پیشنهادی توسط سیمیو[19] که وابسته به ارتفاع از سطح زمین می‌باشد، در مطالعات متعددی در زمینه پاسخ طولی ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار گرفته است که فرمول آن به صورت زیر است:

$$S_u(z,n) = \frac{u_*^2}{n}\frac{200f}{[1+50f]^{5/3}} \qquad f = \frac{nz}{\bar{U}(z)} \qquad (١٦)$$

در رابطه فوق، z ارتفاع، f فرکانس کاهش یافته، n فرکانس تحریک، $\bar{U}(z)$ سرعت میانگین باد در ارتفاع مورد نظر و u_* سرعت اصطکاکی باد می‌باشد که از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$u_* = \sqrt{\kappa} U_b \quad (۱۷)$$

κ ضریب پسای سطحی است که وابسته به زبری ناحیه است و U_b سرعت مبنای باد می‌باشد. همبستگی نوسانات سرعت باد بین دو نقطه، با افزایش فاصله آنها کاهش می‌یابد. ویکری [20] رابطه دوبعدی زیر را برای تابع همبستگی سرعت باد پیشنهاد داده است:

$$coh_{jk}(\omega) = exp\left\{ \frac{-|\omega|}{2\pi} \frac{\sqrt{c_z^2 (z_j - z_k)^2 + c_y^2 (y_j - y_k)^2}}{\frac{1}{2}[\bar{U}(z_j) + \bar{U}(z_k)]} \right\} \quad (۱۸)$$

y و z به‌ترتیب مختصات افقی و ارتفاعی نقاط، ω فرکانس زاویه‌ای، $\bar{U}(z)$ سرعت میانگین باد و c_y و c_z ضرایب ثابت هستند.

طیف نیروی عرضی باد. برای تعیین ماتریس طیف نیروی عرضی باد از مطالعه لیانگ و همکاران[21] که روابط کاملی برای ساختمان‌های با مقطع عرضی مستطیل ارائه داده است استفاده شد. مطابق این مطالعه، برای ساختمان بلند با پلان نشان داده شده در شکل (۲)، طیف نیروی عرضی باد به‌ازای نسبت بعد $\frac{1}{2} \le D/B < 2$ از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{nS(n)}{\sigma^2} = A\frac{H(C_1)}{(1-\bar{n}^2)^2 + C_1\bar{n}^2} + (1-A)\frac{C_2^{0.5}\bar{n}^3}{1.56[(1-\bar{n}^2)^2 + C_2\bar{n}^2]} \quad (۱۹)$$

که n فرکانس تحریک، $\bar{n} = n/n_s$، $n_s = S_t U(z)/B$ فرکانس ریزش گردبادی، S_t عدد استروهال و σ انحراف معیار نیروی عرضی در ارتفاع z می‌باشد. مقادیر S_t و σ از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\sigma = \frac{1}{2}\rho_a U^2(z) \overline{C_L} B \quad (۲۰)$$

$$S_t = 0.002(D/B)^2 - 0.023(D/B) + 0.105 \quad (۲۱)$$

سایر پارامترهای رابطه (۱۹) به صورت زیر قابل تعیین هستند:

$$\overline{C_L} = 0.045(D/B)^3 - 0.335(D/B)^2 + 0.868(D/B) - 0.174 \quad (۲۲)$$

$$H(C_1) = 0.179C_1 + 0.65\sqrt{C_1} \quad (۲۳)$$

$$C_1 = [0.47(D/B)^{2.8} - 0.52(D/B)^{1.4} + 0.24] / (H/\sqrt{S}) \quad (۲۴)$$

$$C_2 = 2 \quad (۲۵)$$

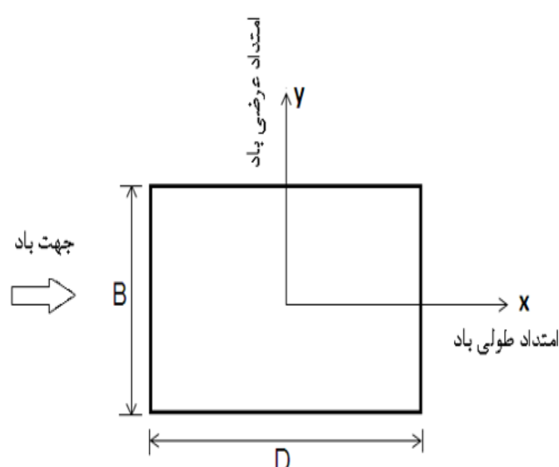
$$A = (H/\sqrt{S})[-0.118(D/B)^2 + 0.358(D/B) - 0.214] + [0.066(D/B)^2 - 0.26(D/B) + 0.894] \quad (۲۶)$$

در روابط فوق، نسبت $H/\sqrt{S}$ ضریب لاغری و $S = B \times D$ سطح مقطع عرضی ساختمان است.

ضریب همبستگی نیروهای عرضی باد بین دونقطه، که با افزایش فاصله بین نقاط کاهش می‌یابد، مطابق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$coh_{jk} = \exp\left[-\left(\frac{\Delta}{\alpha}\right)^2\right], \quad \Delta = \frac{|h_j - h_k|}{B} \quad (۲۷)$$

h_j و h_k ارتفاع نقاط j و k می‌باشد و مقدار پارامتر α در رابطه فوق ۵/۵۶ است [21].



شکل ۲ پلان ساختمان و جهت باد

خصوصیات ساختمان بلند مورد مطالعه و مراحل تحلیل

برای مطالعه تأثیر پارامترهای میراگر جرمی در کنترل ارتعاشات ناشی از باد، مثالی از ساختمان بلند در نظر گرفته شد. مشخصات ابعادی و فیزیکی ساختمان از مطالعه خدایی (۲۰۲۰) استخراج گردید [22]. خصوصیات فیزیکی سازه، فرضیات مهندسی باد و مراحل انجام تحقیق در ادامه تشریح می‌شود.

ساختمان بلند در نظر گرفته شده به ارتفاع ٤۰۰ متر با مقطع عرضی مربعی است که ابعاد پلان آن در ترازهای تحتانی و فوقانی به ترتیب ٥۰ و ٤۰ متر می‌باشد. جرم حجمی ساختمان در این تحقیق، ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. مقدار ممان اینرسی سازه در تراز تحتانی ۷۳۱۷ متر به توان چهار و در تراز فوقانی ده درصد مقدار مذکور است. تغییرات ممان اینرسی در راستای قائم به صورت سهمی درجه ۲ در نظر گرفته شده است. جدول (۱) مشخصات سازه‌ای ساختمان را برای مدل ۲٥ درجه آزادی نشان می‌دهد. اطلاعات ارائه شده شامل ارتفاع، عرض، ممان اینرسی و سطح بادگیر در گره‌ها است. تعداد گره‌های سازه ۲٥ عدد در نظر گرفته شد که با توجه به ارتفاع ٤۰۰ متری ساختمان، فاصله گره‌ها از هم ١٦ متر است. مقدار میرایی سازه برای مود ارتعاشی نخست با فرض ساختمان فولادی، یک درصد در نظر گرفته شد و نسبت‌های میرایی متناظر برای مودهای ارتعاشی بالا با رابطه ارائه شده توسط کریم (۱۹۹٦) محاسبه شد [23].

اطلاعات آیرودینامیکی انتخاب شده به این شرح است:

دانسیته هوا ۱/۲٥ کیلوگرم بر متر مکعب، پارامترهای پروفیل ارتفاعی سرعت میانگین باد برای مراکز شهرهای بزرگ بر مبنای آیین نامه کانادا [18]: a=۰/٦۳۲، b=۳۰ متر و α=۰/۳٦، ارتفاع گرادیان ۳۸۷ متر و ضریب پسا برای ساختمان‌های مستطیلی بلند برابر ۱/۳ می‌باشد.

برای انجام تحلیل‌های مورد نیاز در این تحقیق، از نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب استفاده شد. با توجه به هدف تحقیق، مراحل برنامه تهیه شده به صورت زیر است:

- تعریف مشخصات ابعادی ساختمان.
- تعریف مشخصات مصالح از جمله مدول الاستیسیته، جرم حجمی ساختمان و میرایی ذاتی ساختمان.
- مشخص نمودن موقعیت گره‌های مدل سازه.
- تعیین ماتریس جرم سازه.
- تعیین ماتریس سختی المان‌های تیر.
- تعیین ماتریس سختی کلی سازه و اعمال شرایط مرزی.
- تراکم درجات آزادی دورانی در درجات انتقالی.
- تحلیل مودی سازه و تعیین ماتریس میرایی سازه.
- تعیین سرعت متوسط باد در گره‌ها بر اساس قانون توانی توزیع سرعت باد.
- تعریف مشخصات میراگر جرمی تنظیم شونده و محاسبه ماتریس‌های عمومی جرم، سختی و میرایی.
- تعیین ماتریس انتقال سازه مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده.
- تعریف ماتریس طیف تراکم سرعت طولی و عرضی باد و نیروهای دینامیکی مربوط.
- بهینه‌سازی میراگر جرمی تنظیم شونده.
- محاسبه انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب عرضی و طولی سازه بر مبنای تحلیل حوزه فرکانس.
- بررسی تأثیر پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات ناشی از باد.

تحلیل و نتایج

با استفاده از روش تحلیل و فرضیات ارائه شده در بخش‌های پیشین، پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی طولی و عرضی برای حالات کنترل نشده و کنترل شده محاسبه شد. فرضیات تکمیلی و نتایج هر حالت در ادامه تشریح می‌شود. با توجه به اینکه پاسخ ماکزیمم ناشی از باد در تراز فوقانی سازه اتفاق می‌افتد، انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب در موقعیت مذکور به عنوان مبنای بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور ارزیابی و مقایسه تأثیر سیستم‌های مورد مطالعه، قابلیت کنترل TMD به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$C_o = \left(\frac{\sigma_u - \sigma_c}{\sigma_u} \right) * 100 \qquad (۲۸)$$

که σ_u انحراف معیار پاسخ تراز فوقانی در حالت کنترل نشده و σ_c مقدار پاسخ مذکور در حالت کنترل شده است. برای حصول دقت مناسب پاسخ دینامیکی سازه و همچنین برای پرهیز از حجم بالای محاسبات، بر اساس توصیه انجام شده در مطالعات پیشین [16,22] تعداد گره‌های مدل تحلیلی سیستم، ۲٥ عدد در نظر گرفته شد. در نتیجه، فاصله گره‌ها در راستای قائم ١٦ متر خواهد بود.

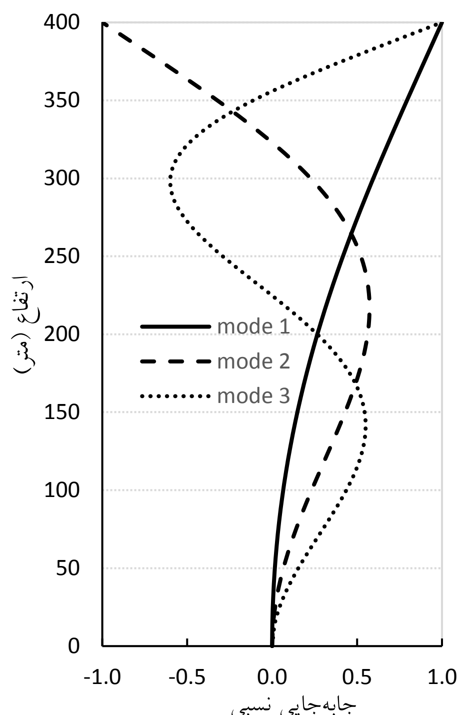
جدول ۱ اطلاعات مدل تحلیلی ساختمان بلند مورد مطالعه

ردیف	ارتفاع (m)	عرض (m)	ممان اینرسی (m^4)	سطح بادگیر (m^2)	جرم (تن)
1	16	49.6	6797.0	793.6	7872.6
2	32	49.2	6302.1	787.2	7746.1
3	48	48.8	5828.2	780.8	7620.7
4	64	48.4	5375.3	774.4	7496.2
5	80	48	4943.6	768.0	7372.8
6	96	47.6	4532.9	761.6	7250.5
7	112	47.2	4143.3	755.2	7129.1
8	128	46.8	3774.7	748.8	7008.8
9	144	46.4	3427.2	742.4	6889.5
10	160	46	3100.7	736.0	6771.2
11	176	45.6	2795.3	729.6	6654.0
12	192	45.2	2511.0	723.2	6537.8
13	208	44.8	2247.7	716.8	6422.6
14	224	44.4	2005.5	710.4	6308.4
15	240	44	1784.4	704.0	6195.2
16	256	43.6	1584.3	697.6	6083.1
17	272	43.2	1405.3	691.2	5972.0
18	288	42.8	1247.3	684.8	5861.9
19	304	42.4	1110.4	678.4	5752.9
20	320	42	994.6	672.0	5644.8
21	336	41.6	899.8	665.6	5537.8
22	352	41.2	826.1	659.2	5431.9
23	368	40.8	773.4	652.8	5326.9
24	384	40.4	741.8	646.4	5223.0
25	400	40	731.3	320.0	2572.8

ساختمان بلند در حالت کنترل نشده. در این قسمت، بخشی از نتایج مقدماتی شامل اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی، جابه‌جایی استاتیکی و کنترل صحت برنامه و همچنین انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب طولی و عرضی سازه در حالت کنترل نشده ارائه می‌شود.

اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی. تعیین اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی از مراحل مهم تحلیل دینامیکی سازه است که از کاربردهای آن، به تعیین ماتریس میرایی ذاتی سازه می‌توان اشاره نمود. تعداد اشکال مودی برای سازه مورد نظر با تعداد درجات آزادی مدل تحلیلی برابر است. لذا برای سازه مورد بررسی، تعداد ۲۵ شکل مودی و فرکانس طبیعی بەدست آمد.

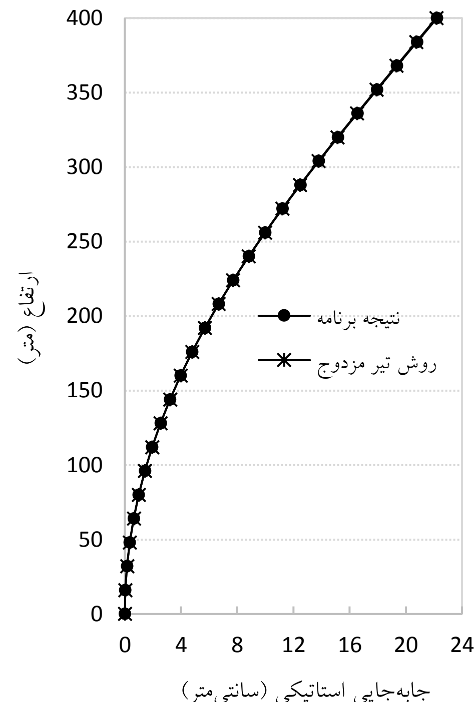
شکل (۳) اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی سیستم را برای سه مود اول نشان می‌دهد. فرکانس‌های طبیعی سه مود اول، به ترتیب ۱/۱۴۶، ۵/۵۳۲ و ۱۳/۴۴۳ رادیان بر ثانیه است.



شکل ۳ اشکال مودی و فرکانس‌های زاویه‌ای سه مود اول ارتعاشی سازه

جابه‌جایی استاتیکی و کنترل صحت برنامه. جابه‌جایی استاتیکی سازه در اثر مؤلفه میانگین سرعت باد در امتداد طولی ایجاد می‌شود. نیروی استاتیکی باد با مجذور سرعت میانگین باد متناسب است و مطابق رابطه (۱۲)، مقدار نیروی استاتیکی باد با افزایش ارتفاع از سطح زمین بیشتر می‌شود. طبق برنامه تهیه شده، تغییر شکل استاتیکی سازه با حاصل ضرب معکوس ماتریس سختی در بردار نیروهای استاتیکی باد به دست می‌آید. از مهمترین مشخصه‌های مدل تحلیلی سازه، ماتریس سختی آن است لذا، از عوامل مهم در صحت برنامه، دقیق بودن ماتریس سختی است که در پاسخ دینامیکی سازه نیز نقش اساسی دارد. برای کنترل دقت برنامه در محاسبه ماتریس سختی سازه و تغییر شکل استاتیکی آن، از روش تیر مزدوج که از روش‌های پایه‌ای در تحلیل سازه است، استفاده شد و تغییر شکل محاسبه شده توسط برنامه، با تغییر شکل حاصل از روش تیر مزدوج (محاسبه شده تو سط نرم‌افزار اکسل) مورد مقایسه قرار گرفت. مراحل روش تیر مزدوج برای سازه مورد نظر به این صورت است:

تعیین شدت نیروی وارده، تر سیم دیاگرام نیروی بر شی و لنگر خمشی، تقسیم مقادیر لنگر خمشی بر سختی خمشی سازه EI، ترسیم تیر مزدوج سازه و اعمال دیاگرام M/EI بر روی آن و در نهایت تعیین لنگر خمشـــی در تیر مزدوج که معادل با خیز در سازه اصلی می‌باشد.



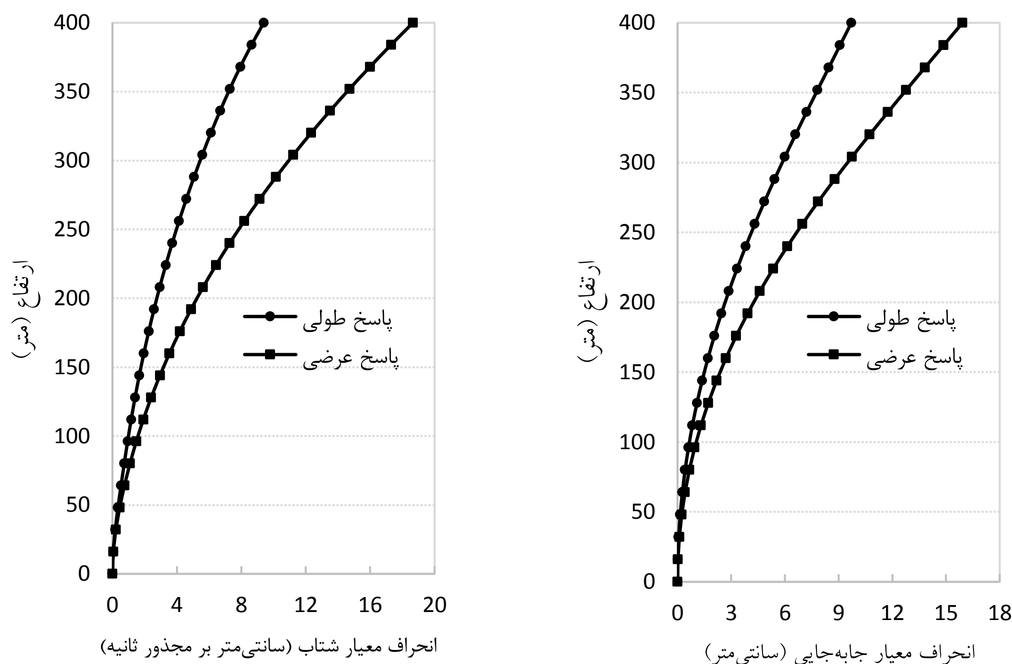
شکل ٤ توزیع جابه‌جایی استاتیکی ناشی از باد در راستای ارتفاعی سازه بر مبنای برنامه و روش تیر مزدوج

شکل (٤) توزیع ارتفاعی جابه‌جایی استاتیکی سازه را با بر مبنای نتیجه برنامه و روش تیر مزدوج نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج دو منحنی خیلی نزدیک به هم هستند و بر روی هم منطبق شده‌اند. جابه‌جایی استاتیکی تراز فوقانی سازه با روش تیر مزدوج ۲۲/۱۷ سانتی‌متر و با برنامه ۲۲/۲۲ سانتی‌متر به‌دست آمده است که اختلاف این دو عدد ۰/۰۵ سانتی‌متر و معادل با ۰/۲ درصد مقدار جابه‌جایی است. در روش تیر مزدوج، برای ترسیم دیاگرام‌های نیروی برشی، لنگر خمشی و تغییر شکل تیر، از روش معادل‌سازی ذوزنقه‌ای برای تعیین مساحت‌ها استفاده شده است، در صورتی که در برنامه تهیه شده از قابلیت انتگرال‌گیری عددی نرم‌افزار استفاده شده است و می‌توان گفت برنامه تهیه شده، نسبت به روش تیر مزدوج، از دقت بالاتری برخوردار است.

پاسخ دینامیکی سازه کنترل نشده. شکل (۵) توزیع ارتفاعی انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب سازه را در اثر نیروهای طولی و عرضی باد نشان می‌دهد. مقدار انحراف معیار جابه‌جایی طولی و عرضی تراز فوقانی سازه به‌ترتیب ۹/۷۱ و ۱۵/۹۲ سانتی‌متر و شتاب طولی و عرضی به ترتیب ۹/۳۹ و ۱۸/٦٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است. مطابق این نتیجه، جابه‌جایی و شتاب عرضی سازه به ترتیب ٦٤ و ۹۹ درصد بیش از پاسخ‌های متناظر طولی می‌باشند. طبق رابطه (۸) و با توجه به اینکه فرکانس اصلی سازه ۰/۱۸۲ هرتز است، ضریب اوج ۳/۷٦ به‌دست می‌آید. لذا، مقدار بیشینه شتاب عرضی سازه حدود ۷۰/۲ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه خواهد بود که فراتر از حد آسایش ساکنان (حدود ۲۰ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه) است. جابه‌جایی طولی کل سازه در تراز فوقانی با جمع نمودن جابه‌جایی دینامیکی بیشینه و جابه‌جایی استاتیکی به دست می‌آید که مقدار آن حدود ۵۸/۷ سانتی‌متر خواهد بود. جابه‌جایی عرضی بیشینه نیز ۵۹/۸٦ سانتی‌متر می‌باشد. در صورتی که برآیند جابه‌جایی طولی و عرضی بیشینه را با روش جذر مربعات محاسبه کنیم، مقدار برایند جابه‌جایی بیشینه ۸۳/۸۳ سانتی‌متر به‌دست می‌آید که مقدار آن در محدوده مجاز جابه‌جایی قرار دارد.

توزیع پاسخ‌های مذکور در ارتفاع سازه به صورت سهموی هست و با افزایش ارتفاع از سطح زمین، ارتعاشات سازه با توان ۲ افزایش می‌یابد، لذا کنترل ارتعاشـــات در ترازهای فوقانی از اهمیت بالایی برخوردار است.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده و مقدمات ارائه شده برای سازه کنترل نشده، در ادامه نتایج حاصل از به کارگیری سیستم TMD جهت کنترل ارتعاشات طولی و عرضی سازه در شرایط مختلف ارائه می شود. ضمناً با توجه به اینکه ارتعاشات عرضی بیش از ارتعاشـــات طولی اســـت، تمرکز عمده مباحث در زمینه کنترل ارتعاشات عرضی می‌باشد.



شکل ٥ تغییرات انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب طولی و عرضی در راستای ارتفاعی سازه کنترل نشده

ساختمان بلند مجهز به سیستم TMD. در این بخش، پاسخ دینامیکی ساختمان بلند مورد مطالعه در حالت مجهز به سیستم میراگر جرمی برای مقادیر مختلف جرم میراگر و ترازهای ارتفاعی محل نصب آن ارائه شده است. نسبت فرکانسی و میرایی سیستم TMD به صورت زیر تعریف شده است:

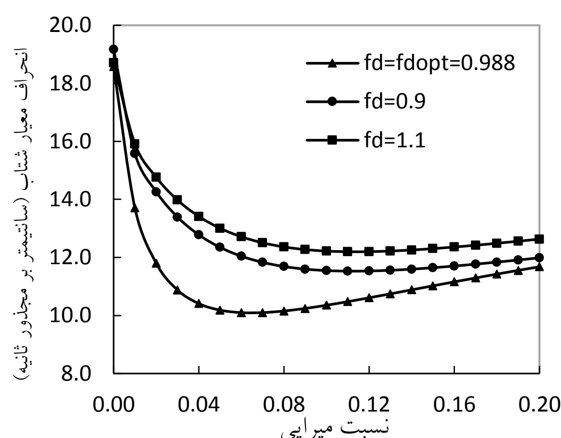
$$f_d = \omega_d/\omega_n \quad و \quad \zeta_d = c_d/(2m_d\omega_n) \qquad (١٨)$$

که m_d، c_d و ω_d به ترتیب جرم، میرایی و فرکانس سیستم TMD و ω_n کمترین فرکانس طبیعی ساختمان می‌باشد.

عملکرد TMD به پارامترهای نسبت فرکانسی و نسبت میرایی وابسته است. برای مشخصات ثابت سازه‌ای و مهندسی باد و جرم معین TMD، پارامترهای مذکور بایستی به نحوی انتخاب شوند که تابع هدف مورد نظر، از قبیل انحراف معیار جابه‌جایی یا شتاب تراز فوقانی سازه کمینه شود. پارامترهای بهینه، عموماً تابعی از جرم میراگر هستند. برای کمینه کردن تابع هدف، از تابع کمینه‌یاب متلب با عنوان fminsearch استفاده شد. برای استفاده از این دستور، تابع هدف و پارامترهای متغیر معرفی می‌شوند و کمینه یاب متلب، تغییرات تابع هدف را به ازای متغیرهای تابع بررسی نموده و با عملیات جستجو، نقطه بهینه مربوط به پاسخ حداقل را می‌یابد. با توجه به اینکه، برای ساختمان مورد مطالعه، کنترل شتاب سازه از اهمیت بالاتری برخوردار است، لذا شتاب تراز فوقانی به عنوان تابع هدف معرفی شد. در این بخش، نتایج حاصل از به کارگیری TMD در مرحله نخست به ازای یک میراگر جرمی ثابت نصب شده در تراز فوقانی تشریح می‌شود و در ادامه تأثیر جرم TMD و موقعیت ارتفاعی محل نصب آن در کنترل ارتعاش سازه تشریح می‌شود.

بررسی تأثیر میراگر جرمی ٥٠٠ تنی واقع در تراز فوقانی. در این قسمت تأثیر یک میراگر جرمی تنظیم شونده ٥٠٠ تنی که در تراز فوقانی سازه نصب گردیده بررسی می‌شود و پارامترهای بهینه و مقدار متناظر قابلیت کنترل ارتعاشات سیستم تعیین می‌شود. برای میراگر جرمی مذکور، مقادیر بهینه نسبت فرکانسی و نسبت میرایی با فرض تابع هدف شتاب عرضی تراز فوقانی سازه با استفاده از تابع کمینه‌یاب متلب به ترتیب ٠/٩٨٨ و ٠/٠٦٥ تعیین شدند. به ازای شرایط بهینه، مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب تراز فوقانی به‌ترتیب ١٠/٦٣ سانتی‌متر و ١٠/٠٩ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است که در مقایسه با سازه کنترل نشده به‌ترتیب ٣٣/٢ و ٤٥/٩٣ درصد کاهش نشان می‌دهند. شکل (٦) تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی سازه را به ازای سه نسبت فرکانسی

مختلف شامل مقدار بهینه، ۰/۹ و ۱/۱ در برابر نسبت‌های میرایی مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در حالتی که ضریب میرایی صفر است، میراگر جرمی نقشی در کنترل ارتعاشات سازه ندارد. با افزایش میرایی، پاسخ سازه کاهش می‌یابد و در یک مقدار مشخصی از نسبت میرایی، به حداقل می‌رسد و پس از افزایش نسبت میرایی از مقدار بهینه، پاسخ سازه افزایش می‌یابد. لذا انتخاب صحیح پارامترهای میراگر جرمی، نقش مهمی در کنترل ارتعاشات سازه دارد. مقدار نسبت میرایی بهینه در این شکل با مقدار به دست آمده توسط تابع کمینه یاب متلب مطابقت دارد. مطابق شکل، با افزایش یا کاهش نسبت فرکانسی در مقایسه با مقدار بهینه، پاسخ سازه نسبت به مقدار بهینه بیشتر می‌شود.



شکل ٦ تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی تراز فوقانی سازه به ازای میراگر ۵۰۰ تنی و نسبت‌های میرایی و فرکانسی مختلف

تأثیر جرم TMD نصب شده در تراز فوقانی در قابلیت کنترل ارتعاش سازه. به منظور ارزیابی تأثیر جرم TMD در کنترل ارتعاشات سازه، انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب عرضی و طولی تراز فوقانی سازه به ازای مقادیر مختلف جرم میراگر در محدوده صفر تا ٦۰۰ تن در حالت نصب شده در تراز فوقانی سازه محاسبه شد. به ازای هر کدام از مقادیر جرم TMD، نسبت‌های بهینه سیستم، انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب تراز فوقانی سازه و انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب TMD محاسبه شد. جدول (۲) مقادیر جرم میراگر را به همراه پارامترهای تشریح شده برای کنترل ارتعاشات عرضی و جدول (۳) نتایج را برای کنترل ارتعاشات طولی نشان می‌دهد. مطابق این جداول، نسبت فرکانسی بهینه، نزدیک به عدد یک است و با افزایش جرم کاهش می‌یابد. میرایی بهینه برای محدوده جرمی بررسی شده، حدوداً بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۷ است و مقدار آن با افزایش جرم TMD بیشتر می‌شود. با افزایش جرم TMD پاسخ سازه و TMD کاهش می‌یابد. مطابق جدول (۲)، انحراف معیار شتاب عرضی سازه کنترل نشده ١٨/٦٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است. با استفاده از میراگر جرمی ٦۰۰ تنی در تراز فوقانی، کمیت مذکور به مقدار ٩/٧٩ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه کاهش می‌یابد که معادل با کاهش ٤٧/٥٣ درصدی است. طبق جدول (۳) کاهش شتاب طولی به ازای میراگر ٦۰۰ تنی حدود ٤٦ درصد است. مقایسه مقادیر پاسخ سازه در جداول (۲ و ۳) نشان می‌دهد ارتعاشات عرضی سازه در حالات کنترل شده و کنترل نشده بیش از ارتعاشات طولی است، به همین دلیل، ادامه نتایج با تمرکز بیشتری بر روی پاسخ عرضی ارائه می‌شود.

جدول ۲ پارامترهای بهینه سیستم TMD نصب شده در تراز فوقانی و پاسخ‌های متناظر عرضی سازه و TMD

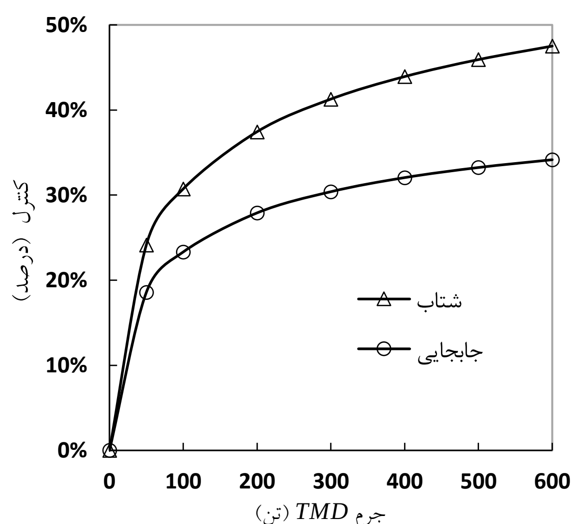
جرم TMD (تن)	پارامترهای بهینه TMD		پاسخ تراز فوقانی سازه		پاسخ TMD	
	$f_{d_{opt}}$	$\zeta_{d_{opt}}$	$\sigma_{x_{cr}}$(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_{cr}}$(cm/s^2)	σ_{x_T}(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_T}$(cm/s^2)
0			15.925	18.660		
50	0.9988	0.0205	12.967	14.151	160.43	208.56
100	0.9972	0.0286	12.210	12.924	107.41	138.43
200	0.9956	0.0409	11.480	11.672	70.23	88.97
300	0.9930	0.0501	11.084	10.956	54.92	68.37
400	0.9910	0.0579	10.820	10.463	46.20	56.49
500	0.9887	0.0649	10.631	10.091	40.54	48.68
600	0.9861	0.0710	10.485	9.794	36.56	43.13

جدول ۳ پارامترهای بهینه سیستم TMD نصب شده در تراز فوقانی و پاسخ‌های متناظر طولی سازه و TMD

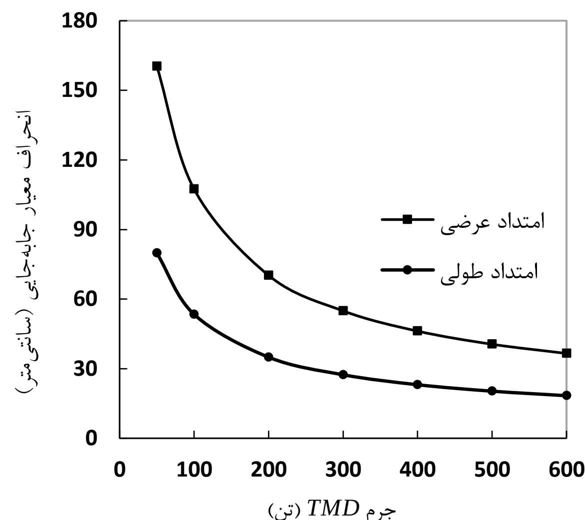
جرم TMD (تن)	پارامترهای بهینه TMD		پاسخ تراز فوقانی سازه		پاسخ TMD	
	$f_{d_{opt}}$	$\zeta_{d_{opt}}$	$\sigma_{x_{al}}$(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_{al}}$(cm/s2)	σ_{x_T}(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_T}$(cm/s2)
0			9.713	9.394		
50	0.9992	0.0190	8.548	7.176	79.84	103.74
100	0.9986	0.0265	8.264	6.574	53.44	68.75
200	0.9971	0.0371	7.994	5.961	34.97	44.06
300	0.9956	0.0452	7.849	5.611	27.39	33.76
400	0.9941	0.0521	7.753	5.369	23.09	27.80
500	0.9927	0.0580	7.684	5.187	20.30	23.89
600	0.9913	0.0634	7.630	5.041	18.36	21.09

شکل (۷) تغییرات کنترل شتاب و جابه‌جایی عرضی تراز فوقانی سازه را در مقابل جرم TMD نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار کاهش شتاب بیشتر از کاهش جابه‌جایی است. برای مثال، به ازای میراگر ۶۰۰ تنی، کاهش شتاب عرضی سازه ۴۸ و جابه‌جایی عرضی ۳۴ درصد است. همچنین، درصد کاهش پاسخ سازه با افزایش جرم میراگر بیشتر می‌شود، با این‌حال، شیب منحنی‌ها با افزایش جرم TMD کاهشی است و این نتیجه نشان می‌دهد که به دست آوردن کاهش پاسخ بیشتر، نیاز به میراگر جرمی خیلی سنگینتری دارد. از طرف دیگر، افزایش جرم TMD موجب افزایش وزن سازه و نیروهای داخلی آن خواهد شد. لذا، جرم میراگر بایستی به نحوی انتخاب شود که ضمن حصول قابلیت کنترل مناسب از غیراقتصادی شدن طرح اجتناب شود.

از عوامل مهم دیگر در به‌کارگیری سیستم TMD، فضای مورد نیاز برای حرکات ارتعاشی آن می‌باشد. شکل (۸) انحراف معیار جابه‌جایی TMD در حالات کنترل ارتعاشات عرضی و طولی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، همان‌طور که انتظار می‌رود، جابه‌جایی TMD در حالت کنترل ارتعاشات عرضی از مقدار مربوطه در حالت کنترل ارتعاش طولی بزرگتر است. همچنین، جابه‌جایی TMD با افزایش جرم آن کاهش می‌یابد. به طور مثال، مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی سیستم TMD در جهت عرضی به ازای مقادیر جرم ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ تن به ترتیب ۱۰۷/۴۱، ۵۴/۹۲ و ۳۶/۵۶ سانتی‌متر است. برای تخمین دامنه جابه‌جایی ماکزیمم TMD از ضریب اوج، مطابق رابطه (۸) می‌توان استفاده نمود که مقدار آن برای سازه مورد نظر ۳/۷۶ به‌دست می‌آید. به‌طور مثال، انحراف معیار جابه‌جایی میراگر جرمی ۶۰۰ تنی برای کنترل ارتعاشات عرضی سازه، ۳۶/۵۶ سانتی‌متر و دامنه بیشینه آن ۱۳۷/۴۶ سانتی‌متر خواهد بود. لذا، در صورتی که محدودیتی در فضای محل نصب TMD وجود داشته باشد، استفاده از میراگرهای با جرم بالاتر مؤثرتر خواهد بود.



شکل ۷ تغییرات کنترل جابه‌جایی و شتاب **عرضی** تراز فوقانی سازه در مقابل جرم TMD



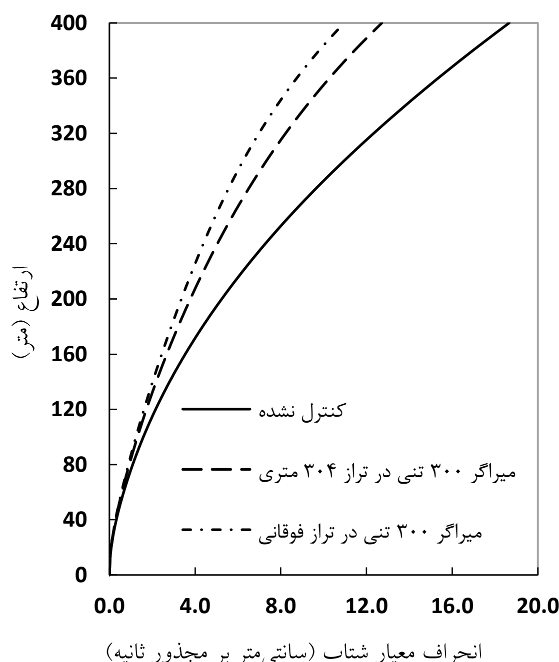
شکل ۸ تغییرات انحراف معیار جابه‌جایی TMD در مقابل جرم آن

تأثیر موقعیت ارتفاعی TMD در کاهش ارتعاشات ناشی از باد.

به منظور بررسی تأثیر موقعیت ارتفاعی سیستم TMD در کاهش پاسخ دینامیکی سازه، پاسخ عرضی تراز فوقانی سازه به ازای سه میراگر جرمی ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی در حالات نصب شده در گره‌های پانزدهم تا گره فوقانی، معادل با محدوده ارتفاعی ۲۴۰ تا ۴۰۰ متری، محاسبه شد.

جدول (٤) نتایج را برای میراگر ۳۰۰ تنی نشان می‌دهد. نسبت‌های میرایی و فرکانسی بهینه و مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب عرضی تراز فوقانی سازه و TMD در این جدول ارائه شده است. مطابق این جدول، نسبت میرایی بهینه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD افزایش می‌یابد. به طور مثال، نسبت میرایی متناظر با ارتفاع‌های ٢٤٠ و ٤٠٠ متری به ترتیب، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۵۰۱ است. پاسخ تراز فوقانی با افزایش ارتفاع محل نصب TMD کاهش می‌یابد. به طور مثال، انحراف معیار شتاب عرضی تراز فوقانی، به ازای موقعیت TMD در تراز ٢٤٠ و ٤٠٠ متری به‌ترتیب ١٤/٣٦ و ١٠/٩٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است که معادل با کنترل ٢٣ و ٤١/٢٦ درصدی هستند. انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب TMD با افزایش ارتفاع محل نصب آن کاهش می‌یابد ولی مقدار تغییرات آن نسبتاً کم می‌باشد. به طور مثال، انحراف معیار جابه‌جایی TMD در ارتفاع‌های٢٤٠ و ٤٠٠ متری به ترتیب ٦٦/٤٤ و ٥٤/٩٢ سانتی‌متر است که نشان می‌دهد جابه‌جایی سیستم TMD در ارتفاع نصب ٢٤٠ متری، ٢١ درصد بیشتر از حالت نصب شده در تراز فوقانی است.

شکل (۹) تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی سازه را در مقابل ارتفاع به ازای سه حالت کنترل نشده و کنترل شده با TMD سیصد تنی واقع در ترازهای ارتفاعی ٣٠٤ متری (گره نوزدهم) و ٤٠٠ متری نشان می‌دهد. مطابق این شکل، حالت کلی تغییر شکل ساختمان در هر سه حالت مشابه هم و مانند مود ارتعاشی اول سازه است. در نتیجه تغییر موقعیت ارتفاعی TMD تغییری در فرم تغییر شکل ساختمان نشان نمی‌دهد. انحراف معیار شتاب تراز فوقانی در حالت کنترل نشده ١٨/٦٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه و در موقعیت ارتفاعی میراگر ٣٠٤ و ٤٠٠ متری به ترتیب ١٢/٧٢ و ١٠/٩٦ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه است؛ لذا کاهش شتاب عرضی سازه برای TMD سیصد تنی در موقعیت‌های ارتفاعی ٣٠٤ و ٤٠٠ متری به ترتیب ٣١/٨٣ و ٤١/٢٦ درصد است، و به بیانی دیگر، کاهش شتاب عرضی سازه به ازای نصب TMD در تراز فوقانی، حدود ٢٩/٦ درصد بیشتر از حالت نصب TMD در تراز ٣٠٤ متری است.



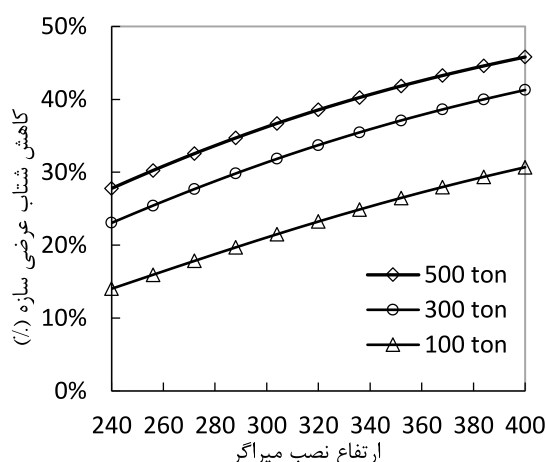
شکل ۹ تغییرات انحراف معیار شتاب عرضی تراز فوقانی سازه در حالات کنترل نشده و کنترل شده با TMD ۳۰۰ تنی نصب شده در ترازهای ارتفاعی ٣٠٤ و ٤٠٠ متری

جدول ٤ پارامترهای بهینه TMD ۳۰۰ تنی نصب شده در ترازهای ارتفاعی مختلف و پاسخ‌های عرضی سازه و TMD

موقعیت ارتفاعی	پارامترهای بهینه TMD		پاسخ تراز فوقانی سازه		پاسخ TMD	
TMD	$f_{d_{opt}}$	$\zeta_{d_{opt}}$	$\sigma_{x_{cr}}$(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_{cr}}$(cm/s^2)	σ_{x_T}(cm)	$\sigma_{\ddot{x}_T}$(cm/s^2)
240	0.9992	0.0191	13.09	14.36	66.44	86.46
256	0.9989	0.0219	12.82	13.91	64.93	84.31
272	0.9984	0.0247	12.56	13.49	63.56	82.31
288	0.9980	0.0274	12.31	13.09	62.47	80.65
304	0.9975	0.0304	12.09	12.72	61.20	78.73
320	0.9969	0.0339	11.88	12.37	59.68	76.45
336	0.9962	0.0368	11.69	12.04	58.71	74.85
352	0.9955	0.0401	11.51	11.74	57.62	73.08
368	0.9947	0.0434	11.35	11.46	56.64	71.43
384	0.9939	0.0467	11.21	11.20	55.75	69.86
400	0.9930	0.0501	11.08	10.96	54.92	68.34

شکل (۱۰) تغییرات درصد کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی سازه را به‌ازای مقادیر مختلف ارتفاع محل نصب TMD و جرم‌های میراگر ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها، کاهش شتاب سازه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD بیشتر می‌شود. نسبت افزایشی کنترل سیستم برای TMD های سبکتر بیشتر است. به طور مثال برای میراگرهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی برای حالتی که میراگرها در تراز ۳۲۰ متری نصب شده باشند به ترتیب ۲۳/۲٤، ۳۳/۷۲ و ۳۸/۵٦ درصد و در حالتی که میراگر در تراز فوقانی نصب شده باشد به ترتیب ۳۰/٦۸، ٤۱/۲۸ و ٤۵/۸۱ درصد است. لذا، درصد کاهش پاسخ سازه به ازای TMDهای سبکتر حساسیت بیشتری نسبت به موقعیت ارتفاعی محل نصب TMD دارند.

در مجموع می‌توان گفت تراز فوقانی سازه موقعیت مناسبتری برای حصول حداکثر کاهش پاسخ سازه است. با این حال، در صورت وجود محدودیت می‌توان سیستم TMD را در ترازهای پایینتر نیز نصب نمود که در این صورت TMD های سنگینتر به دلیل وابستگی کمتر به تراز ارتفاعی در مقایسه با TMD های سبکتر عملکرد مناسبتری دارند. علاوه بر موضوع فوق، با افزایش جرم TMD، دامنه ارتعاش آن کاهش می‌یابد که به عنوان امتیازی برای آن محسوب می‌شود.



شکل ۱۰ تغییرات کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی به ازای تغییر موقعیت ارتفاعی نصب و مقادیر مختلف جرم TMD

نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر میراگر جرمی تنظیم شونده در کنترل ارتعاشات دینامیکی ناشی از باد ساختمان‌های بلند در امتداد عرضی و طولی باد مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر جرم TMD و موقعیت ارتفاعی محل نصب آن در کاهش ارتعاش سازه بررسی شد. برای این منظور، مثالی از ساختمان بلند با ارتفاع ٤۰۰ متر با پلان مربعی به ابعاد ۵۰ و ٤۰ متر به ترتیب در ترازهای تحتانی و فوقانی ارائه شد. مدل تحلیلی سازه به صورت سیستم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها در نظر گرفته شد و رفتار سازه به صورت تیر طره‌ای قائم با المان‌های تیر فرض شد. در حالت نصب TMD در تراز فوقانی سازه، جرم آن بین صفر تا ٦۰۰ تن فرض شد و به منظور بررسی تأثیر موقعیت ارتفاعی

محل نصب TMD، سه میراگر ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی در محدوده ارتفاعی ۲۴۰ تا ۴۰۰ متر مورد ارزیابی قرار گرفتند. در هر حالتِ جرم و ارتفاع نصب معین میراگر، میزان کاهش پاسخ سازه محاسبه شد. از نتایج مهم حاصل از این تحقیق به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

۱- برای ساختمان بلند و مشخصات مهندسی باد فرض شده، نتایج نشان داد پاسخ عرضی سازه بیش از ارتعاشات طولی آن است. شتاب عرضی تراز فوقانی سازه کنترل نشده حدود ۹۹ درصد بیش از شتاب طولی است. همچنین شتاب سازه بیش از حد مجاز آسایش ساکنین بود.

۲- به ازای میراگر جرمی ۶۰۰ تنی در تراز فوقانی، جابه‌جایی و شتاب عرضی تراز فوقانی سازه در مقایسه با حالت کنترل نشده به ترتیب ۳۴ و ۴۸ درصد کاهش می‌یابند و در مجموع تأثیر کاهشی TMD در شتاب سازه بیش از جابه‌جایی بود.

۳- نتایج بررسی اثر تغییرات جرم TMD در محدوده صفر تا ۶۰۰ تن نصب شده در تراز فوقانی نشان داد نسبت فرکانسی بهینه برای مقادیر مختلف جرم میراگر، نزدیک به عدد یک است و وابستگی نسبتا کمی به جرم میراگر دارد ولی نسبت میرایی بهینه با افزایش جرم میراگر افزایش می‌یابد. به طور مثال، مقدار نسبت میرایی برای میراگرهای ۵۰ و ۶۰۰ تنی در حالت کنترل شتاب عرضی به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۷۱ بود.

۴- با افزایش جرم TMD، کنترل جابه‌جایی و شتاب افزایش می‌یابد. به طور مثال، کاهش شتاب عرضی برای میراگرهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ تنی نصب شده در تراز فوقانی به ترتیب ۲۴، ۴۱ و ۴۸ درصد است. همچنین طبق نتایج، شیب منحنی کنترل سازه با افزایش جرم میراگر کاهش می‌یابد و برای به دست آوردن قابلیت کنترل‌های بالاتر به جرم‌های خیلی سنگین تر TMD نیاز خواهد بود.

۵- از عوامل مهم دیگر در به‌کارگیری سیستم TMD، فضای مورد نیاز برای عملکرد آن می‌باشد. انحراف معیار جابه‌جایی TMD با افزایش جرم آن کاهش می‌یابد. به طور مثال در حالت کنترل ارتعاش عرضی، مقادیر انحراف معیار جابه‌جایی سیستم TMD به ازای جرم‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ تن به ترتیب ۱۰۷/۴، ۵۴/۹۲ و ۳۶/۵۶ سانتی‌متر است.

۶- نتایج بررسی تأثیر موقعیت ارتفاعی TMD نشان داد کاهش پاسخ سازه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD بیشتر می‌شود و مقدار افزایشی کنترل برای TMDهای سبک‌تر بیشتر است. به طور مثال برای میراگرهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ تنی کاهش شتاب عرضی تراز فوقانی برای حالتی که میراگرها در تراز ۳۲۰ متری نصب شده باشند به ترتیب ۲۳/۲۴، ۳۳/۷۲ و ۳۸/۵۶ درصد و در حالتی که میراگر در تراز فوقانی نصب شده باشد به ترتیب ۳۰/۶۸، ۴۱/۲۸ و ۴۵/۸۱ درصد است.

۷- نسبت میرایی بهینه با افزایش ارتفاع محل نصب TMD افزایش می‌یابد. به طور مثال برای میراگر ۳۰۰ تنی، نسبت میرایی بهینه متناظر با ارتفاع نصب‌های ۲۴۰ و ۴۰۰ متری برای کنترل ارتعاشات عرضی به ترتیب، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۵۰۱ است. انحراف معیار جابه‌جایی و شتاب سیستم TMD با افزایش ارتفاع محل نصب آن کاهش می‌یابد ولی مقدار تغییرات آن نسبتا کم می‌باشد. به طور مثال، برای میراگر ۳۰۰ تنی، انحراف معیار جابه‌جایی TMD نصب شده در ارتفاع‌های ۳۲۰ و ۴۰۰ متری به‌ترتیب ۵۸/۶۸ و ۵۴/۹۲ می‌باشد که نشان می‌دهد مقدار جابه‌جایی سیستم TMD در ارتفاع نصب ۳۲۰ متری، حدود ۷ درصد بیشتر از حالت نصب شده در تراز فوقانی است.

مراجع

[1] T. Balendra, *Vibration of buildings to wind and earthquake loads*, Springer Verlag, Department of Civil Engineering National University of Singapore, 1993.

[2] A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura, “Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications,” *Journal of wind and structures*, vol. 3, no. 4, pp. 201-251, 1999.

[3] J.A. Amin, A.K. Ahuja, “Aerodynamic modifications to the shape of the buildings: A review of the state-of-the-art,” *Asian journal of civil engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 433-450, 2010.

[4] A. Sharma, H. Mittal, A. Gairola, "Mitigation of wind load on tall buildings through aerodynamic modifications: Review", *Journal of Building Engineering*, vol. 18, pp. 180–194, 2018.

[5] A. Ghorbani-Tanha, K. Noorzad and M. Rahimian, "Mitigation of wind-induced motion of Milad tower by tuned mass damper," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 18, pp. 371–385, 2009.

[6] X. Lu, and J. Chen, "Parameter optimization and structural design of tuned mass damper for Shanghai centre tower," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 20, pp. 453–471, 2011.

[7] M. Y. Liu, W. L. Chiang, J. H. Hwang, Ch. R. Chu, "Wind-induced vibration of high-rise building with tuned mass damper including soil–structure interaction," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, pp. 1092–1102, 2008.

[8] A. Y. T. Leung, H. Zhang, C. C. Cheng, and Lee,Y. Y., "Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 37, no. 9, pp. 1223-1246, 2008.

[9] A. Edris Taha, S. Elias, V. Matsagar, A. Jain, "Seismic response control of asymmetric buildings using tuned mass dampers," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, https://doi.org/10.1002/tal.1673, 2019.

[10] M. Kouhdaragh, "Effect of tuned mass damper with various mass fractions on the seismic performance of isolated reinforced concrete structures," *Journal of structural engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 15-25, 2020, (In Persian).

[11] M. Mohebbi, and A. Joghataie, "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms," *The structural design of tall and special buildings*, vol. 21, no. 1, pp. 57-76, 2012.

[12] Ch.Wang, Z. Lü, Tu. Yongming, "Dynamic responses of core-tubes with semi-flexible suspension systems linked by viscoelastic dampers under earthquake excitation," *Advances in Structural Engineering*, vol. 14, no. 5, pp. 801-813, 2011.

[13] N. Khodaie, H. Eimani kalehsar, "Wind-induced vibration control of tall TV towers using a part of the main structure as a vibration absorber substructure," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 109-126, 2019, (In Persian).

[14] B. Samali, E. Mayol, K.C.S. Kwok, A. Mack, P. Hitchcock, "Vibration control of the wind-excited 76-story benchmark building by liquid column vibration absorbers," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, no. 4, pp. 478–485, 2004.

[15] J.C. Wu, and J.N. Yang, "Active control of transmission tower under stochastic wind," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 2, pp. 1302-1312, 1998.

[16] K. H. Eimani, N. Khodaie, "Parametric study of the along-wind and across-wind responses of tall RC chimneys using the frequency domain analysis," *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, vol. 4, no. 2, pp. 148-160, 2017.

[17] A.G. Davenport, "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading," *Proc. of the Institution of Civil Engineers*, vol. 28, no. 2, pp. 187-196, 1964.

[18] National Research Council (NRC), User's guide-NBC: structural commentaries (Part 4 of Division B), Canadian Commission on Building and Fire Codes, Ottawa (Canada), 2005.

[19] E. Simiu, "Wind spectra and dynamic along wind response," *Journal of Structural Division, ASCE*, vol. 100, pp.

1897-1910, 1974.

[20] Vickery, B.J., “On the reliability of gust loading factors,” *Proc., Tech. Meet. Concern. Wind Loads Build. Struct.*, vol. 30, pp. 296–312, 1970.

[21] S. Lianga, S. Liu, Q.S. Li, L. Zhang, M. Gu, “Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, pp. 1757–1770, 2002.

[22] N. Khodaie, “Vibration control of super-tall buildings using combination of tapering method and TMD system,” *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 196, no. 104031, 2020.

[23] A. Kareem, “Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 59, pp. 131-157, 1996.